

Avaliação térmica de compósitos de polipropileno reforçados com resíduos de grafite

Rebeca Nascimento Alves¹; 0009-0006-6469-6547

Renata Martins Pereira¹; 0000-0002-9964-7466

André Luiz Cury de Paula Cópio¹; 0009-0007-6764-2453

Cirlene Fourquet Bandeira¹; 0000-0001-7034-2477

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.
cirlene.bandeira@for.org.br (contato principal)

Resumo: Analisando o processo de manutenção de motores elétricos, percebeu-se que o descarte de escovas elétricas de grafite apresentava um volume considerável. Esse grafite possuía ótimas propriedades, o que o tornava um excelente material para aplicações na indústria, especialmente onde se exige resistência mecânica, em particular à fricção e à temperatura. Com isso, esse resíduo tem sido incorporado a matrizes poliméricas, especialmente o polipropileno, devido as suas propriedades, baixo custo e facilidade de processamento. Entretanto, faz-se necessário avaliação dos produtos. Sendo assim, este trabalho, buscou-se analisar compósitos de polipropileno reforçado com grafite extraído das escovas elétricas descartadas no processo de manutenção, com granulometria inferior a 500 mesh, nas proporções de 5%, 10% e 20% para analisar o comportamento das misturas em comparação ao polímero puro. O resultado obtido nos ensaios de TGA mostram que o grafite atua como um estabilizador térmico para o polipropileno, resultando em uma melhoria substancial na estabilidade térmica. Nas curvas de DSC é possível observar que a presença do grafite não alterou significativamente a temperatura de onset de fusão. Com isso, além de ajudar a mitigar os impactos ambientais, é possível ampliar a área de aplicação deste polímero em setores tais como peças de automóveis, componentes eletrônicos ou embalagens.

Palavras-chave: Escovas elétricas. TGA. DSC. Reciclagem. Motores elétricos

INTRODUÇÃO

A crise do petróleo, vem se agravando desde a década de 70, seja pela lei da oferta e demanda ou pelas tensões geopolíticas nas regiões do oriente médio. Estima-se que a produção mundial de petróleo pode atingir seu pico em 2050, com as reservas atuais projetadas para durar mais 50 anos. O Brasil deve voltar a importar petróleo até o fim desta década ou início da próxima, devido ao declínio da produção de seu pré-sal (CASADO, 2024; MARTINS, 2025).

Todo esse cenário vem causando grande comoção, não apenas no mercado automobilístico, mas também em outros setores que fazem uso direto ou indireto dos derivados de petróleo. Neste cenário, vários setores vêm se mobilizando, de forma a substituir, parte desses derivados por materiais alternativos, que além de minimizar o consumo desse material, promovem a melhora das propriedades do produto final. Dentre esses, os compósitos poliméricos, especialmente de polipropileno (PP) tem ganhado destaque (ALSABRI, TAHIR, AL-GHAMDI, 2022; LANDIM, 2024; ONOFRIO NETO, 2021).

O PP, que tem sua origem dos derivados de petróleo, é um dos polímeros mais produzidos mundialmente. Estima-se que sua produção atual é de, aproximadamente. 91,98 milhões de toneladas (2024), podendo atingir 121,81 milhões de toneladas em 2029. Sua aplicabilidade é grande devido, especialmente, ao seu baixo custo e fácil processabilidade, além de apresentar potencial de reciclagem. Apresenta, também, boas propriedades térmicas, mecânicas e físicas (ALSABRI, TAHIR, AL-GHAMDI, 2022). Porém, a sua faixa de aplicabilidade e as suas propriedades podem ser aumentadas quando combinado com outros materiais (CÓPIO, 2024).

O grafite vem se destacando como um reforço interessante, devido às suas propriedades elétricas e mecânicas. Este material é um alótropo do carbono, caracterizado por uma estrutura lamelar que infere ao material uma alta condutividade elétrica e térmica. Sua maciez e estabilidade térmica, também, o tornam útil em uma variedade de aplicações industriais. Por conta destas propriedades, é comum à sua utilização em produtos tais como: escovas elétricas, revestimentos metálicos e lubrificantes sólidos (ALMEIDA, 2023; CAMPOS et al, 2022; DONDA et al., 2023; SILVA FILHO, 2020).

Um dos setores que mais se beneficia das propriedades do grafite é a de motores elétricos que utiliza escovas elétricas, que são feitas de grafite ou uma mistura deste com outros materiais, para conduzir eletricidade (BORGES, 2007).

Este material, apesar de resistente, com o uso, apresenta desgaste, fazendo com que não haja mais contato e, conseqüentemente, transmissão da energia. Com isso, faz-se necessário sua substituição, que gera uma quantidade de resíduo bastante substancial (ARESI, 2018; CÓPIO, 2024).

Visando mitigar a quantidade de resíduos gerados que vem causando problemas de cunho ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos e atender a Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), produziu-se compósitos de PP com 5%, 10% e 20% de grafite oriundo de escovas elétrica (CÓPIO, 2024).

No entanto, é de fundamental importância a avaliação das propriedades térmicas deste material de forma a verificar seu comportamento frente as condições de trabalho aos quais serão dispostos. Em frente a este fator, este trabalho visa avaliar as propriedades térmica, via DSC (Calorimetria Exploratória Diferencial) e TGA (Termogravimetria) dos compósitos de PP e grafite de escovas elétricas e comparar com o polímero puro (LANDIM, 2025; CÓPIO, 2024).

MÉTODOS

Material

Foram ensaiados três compósitos de polipropileno da marca Braskem, com densidade entre 0,89 e 0,93 g.cm⁻³, tensão de ruptura que varia de 0,27 MPa a 40 MPa, resistência ao impacto (Izod) de 5,3 J.m⁻¹ a 100 J.m⁻¹ e temperatura de deflexão térmica de 98 °C, e pó de grafite, com granulometria inferior a 500 meshes (32 µm) proveniente de escovas elétricas descartadas após o processo de reparo de motores elétricos em uma empresa de manutenção da região, que foram processados em um homogeneizador termocinético Dryzer (modelo MH-50H da MH Equipamentos) e injetados em uma injetora de bancada RAY RAM, modelo TSMP (CÓPIO, 2024; LANDIM, 2024).



Análise Térmica (TGA e DSC)

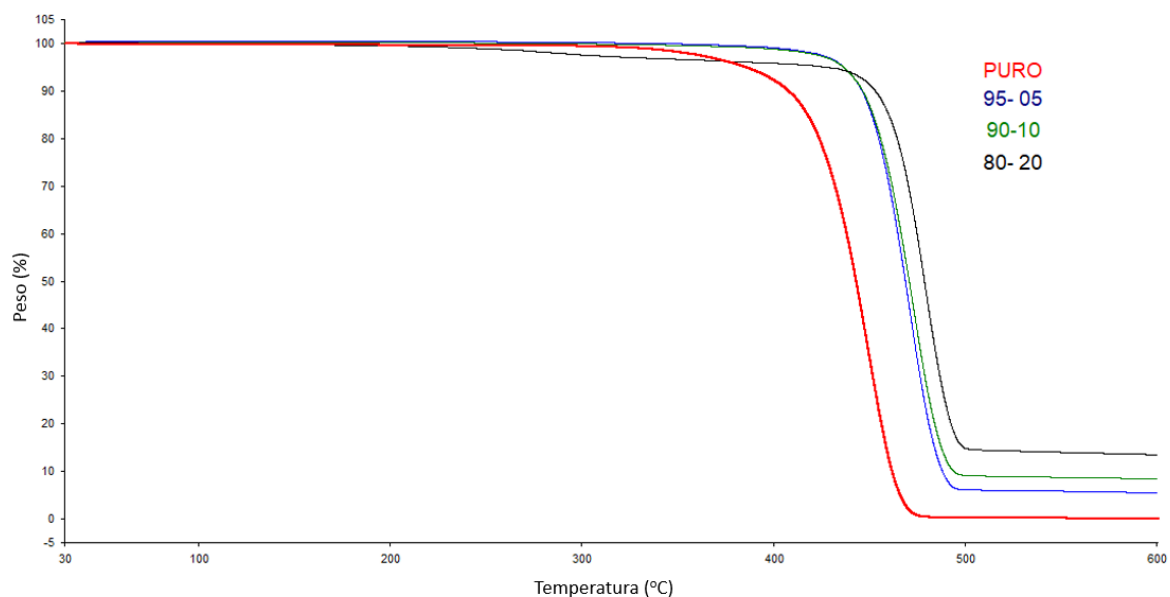
Os ensaios de térmicos foram realizados em um equipamento de análise simultânea (STA), da marca PerkinElmer, modelo 6000, na faixa de 30 °C a 600 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹, em recipientes de alumina que continham, aproximadamente, 6 mg de amostra em atmosfera inerte de nitrogênio cujo fluxo era de 20 mL.min⁻¹.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Termogravimetria

As curvas termogravimétricas do PP puro (Figura 1 e Tabela 1) apresentam apenas um decaimento, indicando que o material é puro (LANDIM, 2024). Além disso, os dados mostram que, com a adição do grafite, houve um aumento da temperatura inicial de degradação do polipropileno que passa de 328 °C (PP puro), para 378 °C (PP + 5% de grafite). Isso representa um aumento significativo de 50 °C em comparação com o PP puro.

Figura 1 – Curvas de TGA dos compósitos de PP e Grafite, nas proporções de 95-5, 90-10 e 80-20 respectivamente e do polímero puro



Fonte: (NOKIA, 1800)

Tabela 1 – Dados extraídos das curvas de TGA

Amostra	Temperatura Inicial de degradação (°C)	Perda total (%)	Teor de resíduo (%)
PP Puro	328,4	100,0	0,0
PP+5% de grafite	378,2	96,1	3,9
PP+10% de grafite	379,0	93,3	6,7
PP+20% de grafite	410,8	88,5	11,5

Fonte: (AUTORES, 2024)

Entretanto, a temperatura de degradação permaneceu, aproximadamente, a mesma (379 °C), mostrando que, a partir de 5%, a adição de mais grafite não teve um efeito adicional imediato na temperatura de início da degradação. É possível que o efeito de estabilização esteja saturando ou que outros fatores estejam entrando em jogo.

Com o acréscimo de 20% de grafite, a temperatura de degradação aumentou para 411 °C. Esse é um salto considerável em relação aos compósitos com 5% e 10% de grafite.

Estes resultados indicam que o grafite está atuando como um agente de estabilização térmica para o PP que pode ser atribuído a alguns mecanismos tais como a formação de barreira física, onde as partículas de grafite, que têm alta condutividade térmica e uma estrutura em camadas, podem atuar como uma barreira física para a difusão de calor e de produtos voláteis da degradação, retardando o processo de decomposição do polímero, a propriedades de barreira, atribuídos a alta área superficial e a estrutura do grafite podem criar uma barreira para a movimentação de cadeias poliméricas, o que pode exigir mais energia (calor) para iniciar a quebra da cadeia ou efeitos de enchimento, onde a presença das partículas de grafite podem alterar a estrutura geral do compósito, dissipando o calor de forma mais eficiente e, assim, retardando a degradação térmica do polímero (CÁCERES; CANEVAROLO, 2009; SILVA, 2016).



Além disso, o teor de resíduo aumenta com o aumento de grafite. O teor de resíduo, geralmente medido após a degradação térmica completa do polímero sob atmosfera inerte (como nitrogênio), corresponde à massa que não se volatiliza. No caso de compósitos de polímero/grafite, esse resíduo é, em grande parte, o próprio grafite.

Entretanto, o teor de grafite real nas amostras de compósitos é consistentemente menor do que a quantidade nominal adicionada durante a sua preparação. Isso pode indicar, que a homogeneização durante o preparo do compósito, não foi adequada.

Calorimetria Exploratória Diferencial

As curvas de DSC do PP puro, bem como as demais curvas, apresentaram um único pico endotérmico, que se deve à fusão do polímero, com temperatura de *onset* de, aproximadamente, 156 °C, mostrando que as temperaturas de fusão permaneceram praticamente inalteradas com a adição de grafite (Tabela 2), sendo, consideradas, as variações de 1 °C a 2 °C, marginais, dentro da faixa de erro experimental (LANDIM, 2024).

Tabela 2 – Dados extraídos das curvas de DSC

Amostra	Temperatura de <i>Onset</i> (°C)	Temperatura de Pico (°C)
PP Puro	156,2	170,1
PP+5% de grafite	157,4	170,9
PP+10% de grafite	154,6	169,6
PP+20% de grafite	157,7	169,2

Fonte: (AUTORES, 2024)

CONCLUSÕES

Os resultados da TGA demonstram que o grafite é um estabilizador térmico eficaz para o polipropileno. A adição de 5% de grafite já resulta em uma melhoria substancial na



estabilidade térmica. Aumentar a porcentagem para 20% leva a uma melhoria ainda mais significativa, mostrando que a estabilidade térmica pode ser ajustada variando a quantidade de grafite no compósito.

Já os resultados de DSC, demonstram que a presença do grafite não alterou significativamente a estrutura das lamelas cristalinas do polipropileno, ou seja, não houve um impacto considerável na temperatura em que a fusão começa.

Isso demonstra que o PP pode suportar temperaturas mais elevadas, tendo sua aplicação estendida outros seguimentos tais como peças de automóveis, componentes eletrônicos ou embalagens que requerem esterilização, prolongando assim a vida útil do material.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao UniFOA por sua contribuição.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. P. **O estudo das propriedades mecânicas e elétricas da liga Al-1%Si com adição de nanotubos de carbono de paredes múltiplas**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 69p., 2023.

ARESI, R. M. **Estudo do comportamento das escovas de um motor CC em função da corrente aplicada**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 72p., 2018.

CAMPOS, I. H. M. **Metodologia e análise de desempenho na tecnologia de coleta de corrente em máquinas elétricas: estudo de caso em um acionamento ferroviário**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 124p., 2023.

CAMPOS, I. H. M.; MAIA, T. A.C.; FARIA, M. T. C. Desempenho da Comutação de Máquinas Rotativas de Corrente Contínua. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2022. **Anais...** Disponível em: https://www.sba.org.br/cba2022/wp-content/uploads/artigos_cba2022/paper_9293.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

CÁCERES, C. A.; CANEVAROLO, S. V. Degradação do Polipropileno durante a Extrusão e a Geração de Compostos Orgânicos Voláteis. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 79-84, 2009.

CASADO, J. Petrobras avisa: Brasil volta a importar petróleo no fim da década. **Veja**, 28 fev. 2024.

CÓPIO, A. L. C. P. **Desenvolvimento e caracterização de compósito de polipropileno reforçado com resíduo de escovas elétricas de grafite utilizadas em motores elétricos**. 2024. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 49p., 2024.

DONDA, G. M.; ORTEGA, F. S.; CHAVIER, G. D.; LIMA, J. V. F.; RICARDO, F. V.; OLIVEIRA, I. R. Caracterização de Nanocompósitos Poliméricos Reforçados com Grafeno: Estudo das Propriedades e Processos de Mistura. **Revista Processos Químicos**, UniVap, 2023.

LANDIM, J. C. **Obtenção e caracterização de material compósito com base de poliacetato reforçado com biomassa de casca de castanha do pará (Bertholletia excelsa)**. 2024. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 69p., 2024.

ONOFRIO NETO, J. C. F. **Análise e perspectivas do mercado de polipropileno**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 38p., 2021.

PETRÓLEO & ENERGIA. **O petróleo pode acabar?**, 12 jan. 2021. Disponível em: <https://www.petroleoenergia.com.br/o-petroleo-pode-acabar/>. Acesso em: 15 set. 2025.

PETRY, A. **Mercado brasileiro de polipropileno com ênfase no setor automobilístico**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 35p., 2011.

SABRI, A. A.; TAHIR, F.; AL-GHAMDI, S. G. Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region. **Materials Today: Proceedings**, v. 51, p. 1-6, jan. 2022.

SILVA FILHO, J. C. **Síntese, caracterização e aplicação do Óxido de Grafeno reduzido como agente de moagem na preparação de pós TR-Fe-B**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 95p., 2020.

SILVA, P. A. P. **Nanocompósito de polipropileno reforçado com grafeno**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 58p., 2016.